

基于力信号的铝基碳化硅精密铣削参数试验研究

叶宇超*, 刘嘉昊

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月7日; 录用日期: 2023年3月9日; 发布日期: 2023年3月16日

摘要

铝基碳化硅具有高耐磨性、低重量、高强度、高刚度、低膨胀系数、高导热等先进力学性能, 广泛应用于汽车、铁路、航空航天等行业。该材料的应用主要限制是加工困难, 这导致了低产量和高加工成本。本研究旨在探讨精密铣削加工中金属复合材料的最佳铣削参数。利用正交试验方法, 选取主轴转速、进给速度和切削深度为自变量, 通过在德玛吉DMC 650 V立式加工中心开展铝基碳化硅铣削试验, 得到相应的试验数据, 通过因素水平分析得到主轴转速、进给速度和切削深度对铣削力的影响程度, 结果表明影响铣削力大小的顺序依次为: 切削深度、进给速度和主轴转速, 拟合了铣削力方程, 采用NSGA_II多目标优化算法, 计算得在切削深度为0.1 mm, 进给速度为50 mm/min, 主轴转速为1500 r/min时铣削质量最好。

关键词

铝基碳化硅, 铣削, 铣削力

Experimental Study on Precision Milling Parameters of Aluminum-Based Silicon Carbide Based on Force Signal

Yuchao Ye*, Jiahao Liu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 7th, 2023; accepted: Mar. 9th, 2023; published: Mar. 16th, 2023

Abstract

Aluminum-based silicon carbide has high wear resistance, low weight, high strength, high stiffness,

*第一作者。

low expansion coefficient, high thermal conductivity and other advanced mechanical properties. It is widely used in automobile, railway, aerospace and other industries. The main limitation of the application of this material is the difficulty of processing, which leads to low yield and high processing cost. This study aims to explore the optimal milling parameters of metal composites in precision milling. The orthogonal test method was used to select the spindle speed, feed speed and cutting depth as independent variables. The aluminum-based silicon carbide milling test was carried out in the DMC 650 V vertical machining center of Demag, and the corresponding test data were obtained. The influence of spindle speed, feed speed and cutting depth on the milling force was obtained by factor level analysis. The results show that the order of influence on the milling force is: cutting depth, feed speed and spindle speed. The milling force equation was fitted. The NSGA-II multi-objective optimization algorithm was used to calculate the cutting depth of 0.1 mm and the feed speed of 50 mm/min. The milling quality is the best when the spindle speed is 1500 r/min.

Keywords

Aluminum-Based Silicon Carbide, Milling, Milling Force

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/Al)具有轻质、高比模量、比强度、耐磨性和耐高温等优点,已成为复合材料中重要的主导材料[1],成功应用于军事、汽车、电子、航空航天和体育器材等行业[2][3]。由于碳化硅(SiC)颗粒的硬度和研磨性,这些材料极难加工(车削、铣削、钻孔、螺纹加工),刀具在切削过程中磨损严重,导致产量低,加工成本高,因此该材料也被称为难以加工的材料。这一因素阻碍了更多的制造商采用金属复合基材料,虽然热压[4]和冷压技术[5]等加工操作,试图去避开传统的加工技术,但它们是有限的,对于高精度,高效率的零部件需求,机加工仍然是部件制造的一个重要组成部分,因此 SiCp/Al 复合材料的加工已成为一个非常重要的研究课题。但是到目前为止,还没有对铣削等间断切削情况下的切削条件、刀具和工件表面完整性进行研究,如果不解决加工问题,金属复合基材料的广泛应用是不可能的。

近几十年来,人们对 SiCp/Al 复合材料的加工进行了大量研究,发现增强相的形貌、分布和体积分数都是影响切削过程的因素[6][7][8]。通过车削试验研究了 SiC 颗粒增强的复合材料表面完整性,得到了降低刀具磨损和加工表面粗糙度的切削条件优化,揭示了车削 SiC 颗粒增强铝基复合材料的切屑形成机理。Ravinder Kumar 研究了切削速度和进给速度对加工后的工件表面质量的影响,建立了神经网络模型对实验结果进行分析结果表明进给速度对材料表面粗糙度的影响大于切削速度[9]。DiazOG 研究发现,切削深度和进给速度的改变可以缩短铣削时间,这样也减少了刀具和工件的接触时间,可提高工件表面质量[10]。目前的研究大多集中在 SiCp/Al 复合材料的车削加工上,其中增强体分数小于 20%。铣削加工是 SiCp/Al 复合材料的另一种重要加工方法,但有关铣削特性对 SiCp/Al 复合材料的影响的研究较少。

本文研究了粒径为 5 μm 、体积分数为 20%的 SiCp/Al 复合材料在硬质合金刀具材料下的铣削适应性。进行正交试验,采用三因素(主轴转速 n 、进给速度 f 、切削深度 a_p)三水平正交试验。通过对试验数据进行因素水平分析,可以得出在相同的实验范围,不同的实验指标下随着试验因素的变动而产生的实验数据的变动,各个因素对于实验的影响程度。最后通过线性回归拟合出刀具铣削力方程,采用 NSGA-II 多

目标优化算法, 以铣削力最大为目标得到的优选参数: 在切削深度为 0.1 mm, 进给速度为 50 mm/min, 主轴转速为 1500 r/min, 铣削力较低, 有效提高精密铣削加工效率, 降低工件表面粗糙度。实验结果对高效、高质量加工金属复合材料具有重要意义。

2. 试验设备

2.1. 工件材料

工件材料为体积分数 20% 的铝基碳化硅, SiC 颗粒的平均粒度为 5 μm 。工件尺寸: 70 mm \times 150 mm \times 3 mm。

2.2. 加工设备以及加工刀具

铝基碳化硅铣削实验基于德玛吉 DMC 650V 立式加工中心开展, 该加工中心主轴转速 14,000 rpm/ 扭矩 121 Nm, 快移速度 36 m/min, SK50 主轴的扭矩 303 Nm。

在铝基碳化硅的加工过程中, 通过 Kistler 力传感器进行实时力信号采集, 用于后续刀具磨损的分析。刀具使用 YG6X 双齿端铣刀。

3. 试验方案和结果分析

3.1. 试验方案

采用正交实验能最大限度地减少实验次数, 并且将铣削力随影响因素的变化情况系统地表现出来。采用 YG6X 铣刀进行多因素正交铣削实验, 选定主轴转速, 进给速度和切削深度 3 个因素, 每个因素取 4 个水平, 用测力仪测量三向铣削力。铣削参数和水平设置如表 1 所示, 图 1 为铣削力测量系统简图。铣削过程如图 2 所示。

Table 1. Milling parameter settings

表 1. 铣削参数设置

铣削水平	进给速度 mm/min	切削深度 mm	主轴转速 r/min
下水平	50	0.05	1000
次下水平	100	0.1	1500
次上水平	150	0.15	2000
上水平	200	0.2	2500

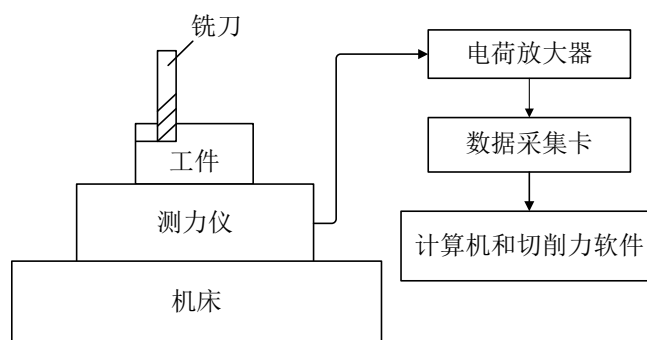


Figure 1. Milling force measurement system diagram

图 1. 铣削力测量系统简图



Figure 2. Milling process of aluminum-based silicon carbide
图 2. 铝基碳化硅铣削过程

3.2. 试验结果与分析

图 3, 图 4 是采集的力信号原始波形图, 图 5 为实验测得的 YG6X 铣刀的铣削力波形的局部放大图, 从图中可以看出铣削力呈周期波动, 在切削周期内铣削力由小到大又由大到小。铣削力测量结果见表 2。实验中切宽为 12 mm, 对铣削力有主要影响的因素为转速、进给速度和切深。用 Matlab 软件对表 2 的正交实验数据进行处理, 可以得到切削参数对铣削力的影响关系曲线, 如图 6、图 7 和图 8 所示。由图 4 可见, 用 YG6X 铣刀切削体积分数 20% 的铝基碳化硅时切深分力 F_z 远大于进给分力 F_x 和主切削力 F_y , 这和切削单相金属有较大区别。产生这种现象的主要原因在于随着 SiC 增强颗粒的增多, 铝基复合材料抗压强度的增大幅度大于抗拉强度的增大幅度, 且 YG6X 铣刀不易磨出极其锋利的刃口, 这使得加工时铣刀会出现严重的“让刀”现象, 增大了工件表面作用于刀具轴向的挤压力。

Table 2. Milling parameters orthogonal experimental record table
表 2. 铣削参数正交实验记录表

实验顺序	轴向切深 mm	进给速度 mm/min	切削速度 r/min	走刀距离 mm	F_x/N	F_y/N	F_z/N	粗糙度 Ra
1	0.1	100	2000	80	58.2669	61.3124	121.9321	0.045
2	0.05	100	1000	80	31.5350	64.7157	128.9898	0.042
3	0.05	200	2000	80	46.4919	57.4039	97.7304	0.049
4	0.1	150	2500	80	72.2371	77.3177	161.2187	0.035
5	0.05	150	1500	80	71.1521	107.0600	243.6285	0.048
6	0.15	50	2000	80	132.9367	104.3177	359.1225	0.033
7	0.05	50	2500	80	70.2090	61.3050	237.1909	0.032
8	0.2	50	1000	80	230.5713	169.3155	520.1776	0.030
9	0.2	150	2000	80	182.8087	159.2120	382.0979	0.045
10	0.1	50	1500	80	224.3668	205.4869	511.1986	0.028
11	0.1	200	1000	80	97.3480	149.3072	371.0335	0.095
12	0.2	200	1500	80	131.2999	165.9316	429.5880	0.072
13	0.2	100	2500	80	134.2565	143.8779	370.2545	0.065
14	0.15	150	1000	80	128.2050	168.7899	372.0854	0.061
15	0.15	200	2500	80	123.0392	273.3855	558.5288	0.055
16	0.15	100	1500	80	272.7955	212.8589	716.7301	0.040

由图 6 可知, 随着转速的增加, YG6X 的铣削力没有明显的变化, 只是 Y 方向的铣削力有缓慢的下降, 这是由于 X 向和 Z 向的铣削力主要来自工件对刀具强烈的挤压作用, 上述让刀现象的存在使 YG6X 铣刀在进给方向 X 向和竖直方向 Z 向上受到的挤压力不会随转速变化而明显改变, 因此铣削力变化很小。

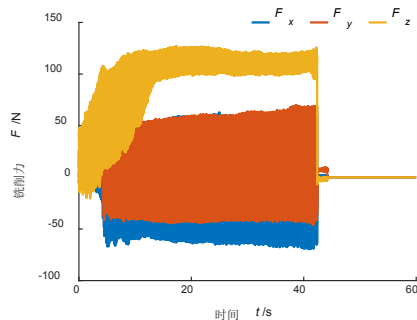
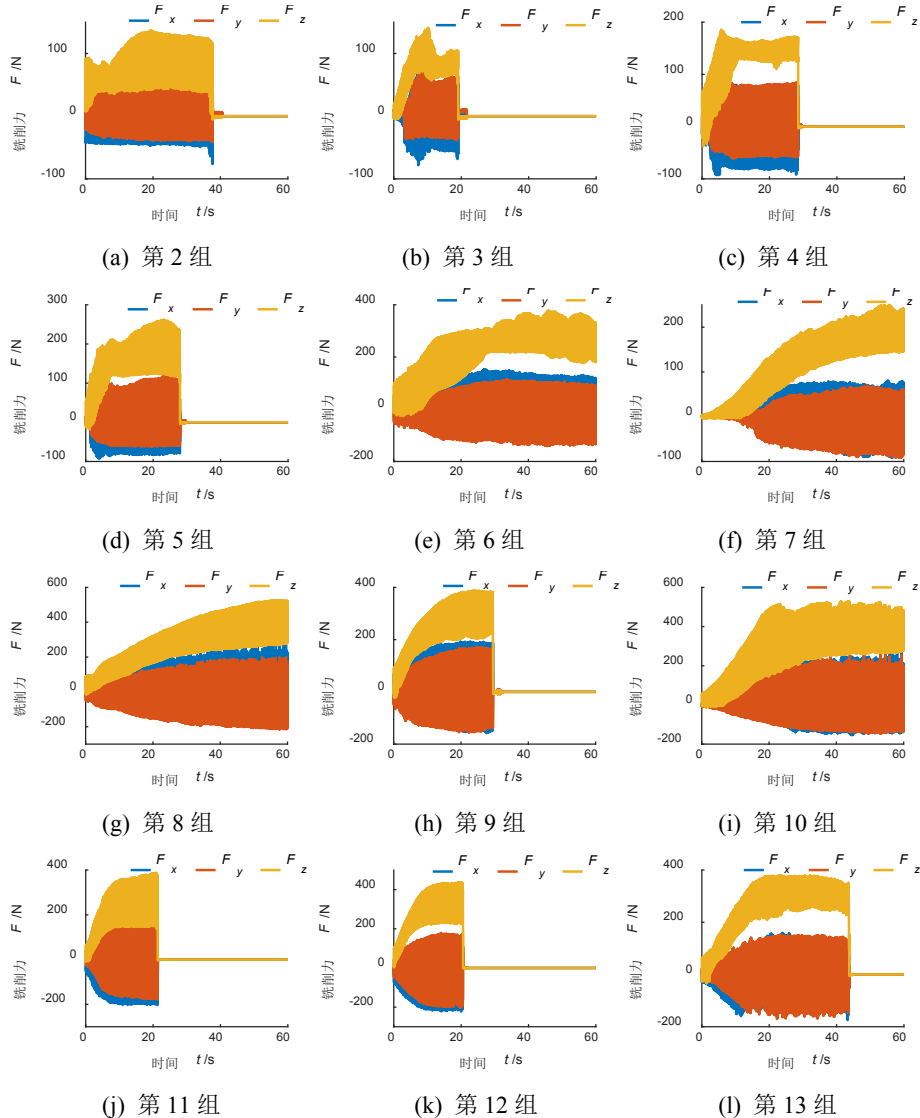


Figure 3. The first group of original signal diagram
图 3. 第 1 组原始信号图



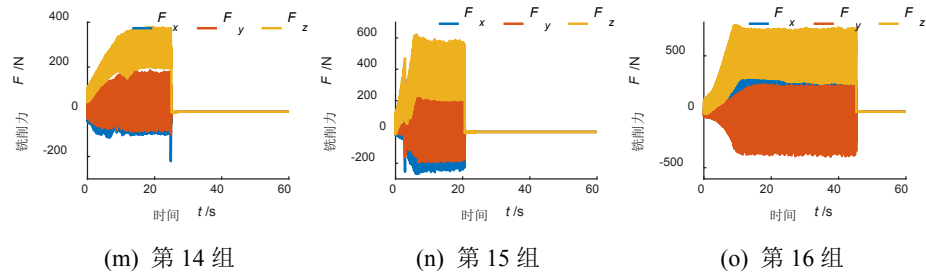


Figure 4. Original signal diagram
图 4. 原始信号图

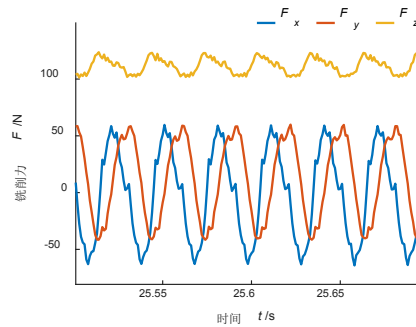


Figure 5. The local amplification diagram of the original signal
图 5. 原始信号局部放大图

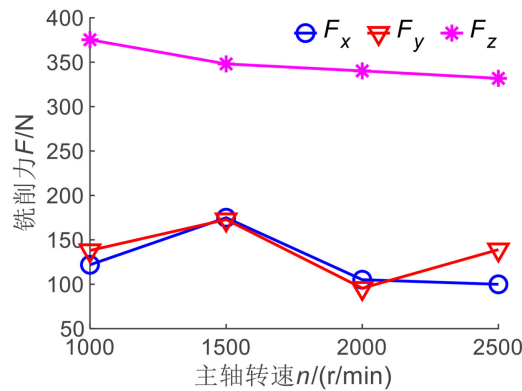


Figure 6. The influence of spindle speed on milling force
图 6. 主轴转速对铣削力的影响

由图 7 可知, 随进给速度的增加, YG6X 铣刀铣削力先逐渐减小再逐步增大, YG6X 铣刀的 X 向和 Y 向力变化幅度几乎相同。由图 8 可知, 随着铣削深度的增加, YG6X 刀具的三向铣削力都大幅增加, 可见切削深度对铣削力有显著影响。对于 YG6X 铣刀, 切削深度超过 0.2 mm 时, Z 向力过大, 反映了切削时机床振动较大, 出于保护设备和刀具的需要, 用 YG6X 铣刀加工铝基复合材料时不宜取过大的铣削深度。

3.3. 铣削参数优化

切削参数与切削力之间有复杂的指数关系, 因此需将表 2 的正交实验数据进行铣削力公式经验建模, 后进行多目标规划得到最佳铣削参数。本次铣削力研究中, 依据多因素正交实验所建立的铣削力通用公式为:

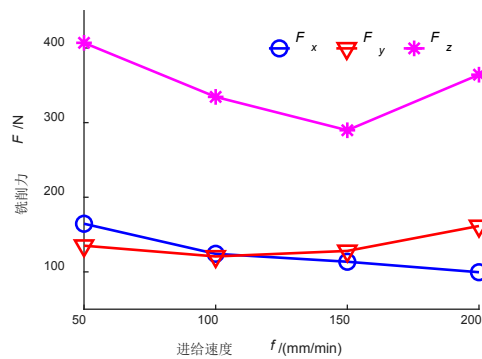


Figure 7. The influence of feed rate on milling force
图 7. 进给速度对铣削力的影响

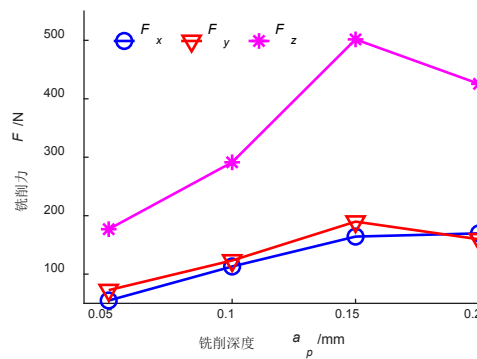


Figure 8. The influence of cutting depth on milling force
图 8. 切削深度对铣削力的影响

$$F = Kn^{b_1} f^{b_2} \alpha_p^{b_3} \tag{1}$$

式中 n 为主轴转速, f 是进给速度, α_p 是切削深度。

便于计算, 对其两边同时取对数:

$$\ln F = \ln K + b_1 \ln n + b_2 \ln f + b_3 \ln \alpha_p \tag{2}$$

简化:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \tag{3}$$

将实验数据代入公式 3 得 16×3 行回归方程:

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{16} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{161} & x_{162} & x_{163} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

用 Matlab 软件进行回归分析, 分别得到 YG6X 铣刀的三向铣削力公式:

X 方向:

$$y_x = 9.1385 + 0.8768\alpha_p - 0.3089f - 0.1462n \tag{5}$$

显著性水平: 0.0026

各系数置信度为 95%的置信区间:

	上区间	下区间
常系数	4.1513	14.1257
系数 1	0.4751	1.2785
系数 2	-0.7106	0.0929
系数 3	-0.7567	0.4642

Y 方向:

$$y_y = 8.0470 + 0.6670\alpha_p + 0.0903f - 0.2970n \quad (6)$$

置信度: 0.0181

各系数置信度为 95%的置信区间:

	上区间	下区间
常系数	3.1364	12.9576
系数 1	0.2715	1.0626
系数 2	-0.3053	0.4858
系数 3	-0.8981	0.3041

Z 方向

$$y_z = 10.4150 + 0.7776\alpha_p - 0.1892f - 0.2840n \quad (7)$$

显著性水平: 0.0197

各系数置信度为 95%的置信区间:

	上区间	下区间
常系数	4.5783	16.2518
系数 1	0.3074	1.2477
系数 2	-0.6594	0.2809
系数 3	-0.9985	0.4305

$$\begin{cases} F_x = 93806.8\alpha_p^{0.8768} f^{-0.3089} n^{-0.1462} \\ F_y = 3124.4\alpha_p^{0.6670} f^{0.0903} n^{-0.2970} \\ F_z = 33356.0\alpha_p^{0.7776} f^{-0.1892} n^{-0.2840} \end{cases} \quad (8)$$

根据实际加工情况, 对三个变量约束范围:

$$0.05 \text{ mm} \leq \alpha_p \leq 0.2 \text{ mm}$$

$$50 \text{ mm/min} \leq f \leq 200 \text{ mm/min}$$

$$1000 \text{ r/min} \leq \alpha_p \leq 2500 \text{ r/min}$$

通过 NSGA_II 多目标优化算法, 以铣削力最大为目标, 并且兼顾加工成本得到的优选参数: $a_p = 0.1$ mm, $f = 50$ mm/min, $n = 1500$ r/min。

4. 结论

随着转速的增加, YG6X 的铣削力没有明显的变化; 随进给速度的增加, YG6X 铣刀铣削力先逐渐减小再逐步增大, YG6X 铣刀的 X 向和 Y 向力变化幅度几乎相同。随着铣削深度的增加, YG6X 刀具的三向铣削力都大幅增加, 可见切削深度对铣削力有显著影响。

影响铣削表面精度的顺序依次为: 切削深度、进给速度和主轴转速。

在切削深度为 0.1 mm, 进给速度为 50 mm/min, 主轴转速为 1500 r/min, 铣削力较大, 有效提高精密铣削加工效率, 降低加工后工件的表面粗糙度。

参考文献

- [1] Mouritz, A. (2012) Introduction To aerospace Materials. Woodhead Publishing Limited, Sawston, 394-400.
- [2] 于海蛟, 周新贵, 张长瑞, 曹英斌, 刘荣军, 张玉娣. SiC 反射镜及其制备工艺的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2006(5): 26-30.
- [3] 陈亚莉. 关于 F-22 的选材分析——F-22 最新进展系列报道之四[J]. 国际航空, 1996(1): 20-23.
- [4] Gorbatyuk, S.M., Pashkov, A.N., Zarapin, A.Yu. and Bardovskii, A.D. (2019) Development of Hot-Pressing Technology for Production of Aluminum-Based Metal-Matrix Composite Materials. *Metallurgist*, **62**, 1261-1266. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00784-0>
- [5] Erturun, V., Çetin, S. and Sahin, O. (2020) Investigation of Microstructure of Aluminum Based Composite Material Obtained by Mechanical Alloying. *Metals and Materials International*, **27**, 1662-1670. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00583-x>
- [6] Pramanik, A., Zhang, L.C. and Arsecularatne, J.A. (2007) An FEM Investigation into the Behavior of Metal Matrix Composites: Tool-Particle Interaction during Orthogonal Cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**, 1497-1506. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.12.004>
- [7] Torralba, J.M., da Costa, C.E. and Velasco, F. (2003) P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview. *Journal of Materials Processing Technology*, **133**, 203-206. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00234-0)
- [8] Kilickap, E., Cakir, O., Aksoy, M. and Inan, A. (2005) Study of Tool Wear and Surface Roughness in Machining of Homogenised SiC-p Reinforced Aluminium Metal Matrix Composite. *Journal of Materials Processing Technology*, **164**, 862-867. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.109>
- [9] Sankar, B.R. and Umamaheswarrao, P. (2020) Multi Objective Optimal Scheme for Machinability Aspects of Al6061-SiC_p Metal Matrix Composite during end Milling—A Hybrid Approach. *Materialstoday: Proceeding*, **21**, 1260-1264. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.115>
- [10] Diaz, O.G., Axinte, D.A., Butler-Smith, P. and Novovic, D. (2019) On Understanding the Micro-Structure of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites (CMCs) after a Material Removal Process. *Materials Science and Engineering*, **743**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.037>